

広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサの光波長 広帯域化とその応用に関する研究

著者	那須野 悟史
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第17599号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00121593

氏名	なすの さとし 那須野 悟史
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 技術社会システム専攻
学 位 論 文 題 目	広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサの 光波長広帯域化とその応用に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 須川 成利 東北大学教授 長平 彰夫 東北大学教授 中村 健二 東北大学准教授 黒田 理人

論文内容要約

科学計測, 医療, 農業などの分野において, 2 次元の波長情報を取得する分光イメージングの利用が拡大しており, 通常のカラー画像では行うことが出来ない物体の検出, 成分分析, 濃度計測等に応用されている. 分光イメージング用途のイメージセンサには, 様々な特性波長を有する分析対象に対応するため, また発光・吸光の輝度差の大きい被写体を解析するために感度光波長帯域の広帯域化, 高感度・広ダイナミックレンジ (DR) 化が求められる. しかし, これまでのイメージセンサ技術では紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域における高感度化と紫外光の長期間の照射による感度・暗電流の経時劣化の抑制とを両立することが困難であり, さらに広 DR 化技術と組み合わせることが出来ておらず分光イメージングに適したイメージセンサの創出が課題であった. 本論文は, こうした背景に鑑み, 広光波長帯域・高紫外光照射耐性フォトダイオード (PD) 形成技術を CMOS イメージセンサの画素 PD に適用し, 広 DR 横型オーバーフロー蓄積容量 (LOFIC) 技術と融合しつつ高感度化を進展させ, さらに 2 次元で複数の波長情報をリアルタイムに取得可能とする分光イメージングシステムへの応用を行った成果をまとめたものであり, 全文 5 章からなる.

第 1 章は, 分光イメージング向けのイメージセンサにおける要求性能として, 広い感度波長帯域, 高感度・広ダイナミックレンジ性能, 高フレームレートについて示した. また, 各要求性能を達成するために解決すべき技術的課題を示した. 1 つ目の課題は, 紫外光は Si に対する侵入長が短く, 光子の有するエネルギーが高いことから, 紫外光に対する感度が低く, さらに感度と暗電流の経時変化を生じることである. 2 つ目の課題は, 従来の 4 トランジスタ型の画素回路において, 電荷電圧変換はフローティングディフュージョン (FD) で行うため, 電荷電圧変換ゲインは FD 容量 (C_{FD}) に反比例し, 一方で飽和電荷量は C_{FD} に比例する関係にあり, 感度とダイナミックレンジのトレードオフ関係に陥ることである. これらの背景を鑑みて本研究では, 広光波長帯域・紫外光高信頼性 PD を広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサの画素内 PD に適用するとともに高感度化を図り, 光波長広帯域化, 紫外光高信頼性化, 高感度・広ダイナミックレンジ化, 低ノイズ化を実現するイメージセンサを創出すること, またこのイメージセンサを応用しリアルタイムに複数の波長情報を取得可能な分光イメージングシステムを創出することを目的とした.

第 2 章では, 広 DR・広光波長帯域 CMOS イメージセンサの構成と要素技術について論じている. 分光分析

機器の 10 年間使用の積算光量に相当する重水素ランプを用いた紫外光照射加速試験によっても感度劣化が生じない PD の不純物濃度プロファイルを明らかにすると共に、LOFIC 用の高容量密度容量素子の構造、光感度向上のためのフローティングディフュージョン容量を低減する構造、埋込チャネルを用いた低ノイズ画素ソースフォロワの素子構造の検討を行った。これらの検討結果より、PD では、Si 最表面の濃度を 10^{18}cm^{-3} でかつ急峻な濃度勾配を形成しドリフト電界を Si 極表面の紫外光侵入領域まで形成することで、紫外光に対する感度と、実機動作を想定した紫外光照射に対しても感度と暗電流の経時変化が抑制できることを確認した。また LOFIC では画素開口率向上が可能であり高照度時の電荷蓄積が可能な、高容量密度で使用電圧範囲が広い低しきい値の MOS 容量が最適であるという設計指針を得た。また FD では、 C_{FD} の構成成分を解析することで、 C_{FD} の大きい割合を占めるゲートオーバーラップ容量、PN 接合容量の低減が、 C_{FD} 低減に有効であることを確認した。そこで、FD 周辺部のゲートオーバーラップ容量低減のため LDD 注入の除去と、PN 接合容量低減のため FD 部のチャネルストップイオン注入を除去することで C_{FD} 低減を実現する設計指針を得た。また画素 SF に、チャネルを SiO_2/Si 界面に形成する表面チャネル構造を用いた場合、ゲート下を通過する電荷が酸化膜中のトラップに捕獲、放出されることにより、信号電圧が時間的に 2 値あるいはそれ以上の離散的な値をランダムに取り、S/N の悪化を引き起こす。そこで、チャネル形成部を SiO_2/Si 界面から遠ざけた埋め込みチャネル構造を形成することで、ゲート酸化膜中のトラップの影響を緩和でき、低ノイズ読み出しを実現する設計指針を得た。併せて、これらを統合して CMOS イメージセンサを製造するために各素子の総熱負荷量が変わらないように、イオン注入、アニールの順序を最適化したプロセスフローを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章で論じた広光波長帯域・紫外光高信頼性 PD、低容量 FD、LOFIC を導入した広 DR CMOS イメージセンサチップを設計、製造して、性能を測定評価した結果について論じた。試作した CMOS イメージセンサは有効画素数 $1280\text{V}\times 960\text{H}$ で、画素アレイ端に複数種類画素形状のテストパターンを配置し、これらを測定することで画素レイアウトの最適形状を示した。また低容量 FD 構造と LOFIC の導入により $240\mu\text{V/e}$ の電荷電圧変換ゲイン、101dB の DR 性能、広光波長帯域・紫外光高信頼性 PD の導入により 190-1100nm の光波長感度帯域を得て、また、分光分析機器 10 年以上の連続動作に相当する紫外光照射に対しても、感度と暗電流の劣化が起こらない事を実証した。この CMOS イメージセンサを用いて、紫外光、可視光、近赤外光源下で人間の手、しめじの撮像を行った結果を図 1 に示す。可視光では観察ができなかった、しみ、血管、しめじの損傷箇所を鮮明に捉えることで、広光波長感度帯域でかつ輝度差の大きい被写体においても撮像が可能であることを実証した。





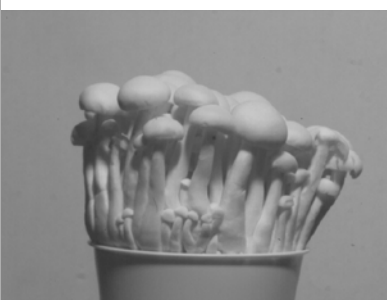
	(a) 紫外光 (340nm)	(b) 可視光	(c) 近赤外光 (940nm)
手			
しめじ			<p>➤ 可視光下で新鮮に見えるしめじは、数日後、紫外光下で確認できる黒色部から傷み始めた。</p>

図1 広光波長帯域・広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサによる撮像結果

第4章では、第3章で論じたイメージセンサ技術を応用したリアルタイム分光イメージングシステムについて論じている。分光イメージング用途に好適な撮像速度 240 フレーム/秒、VGA タイプの CMOS イメージセンサを設計、試作し、複数の中心光波長を有する LED 光源を時分割で切り替える分光イメージング方式と組み合わせた高可搬性システムを構築した結果を論じた。ここで、紫外光から近赤外光の広光波長帯域において撮像を行う際に、光波長毎の屈折率の違いにより色収差の問題が生じる。そこで、色収差を抑制したアクロマティックレンズを組み合わせることで紫外光から近赤外光まで色収差が生じないアクロマティックレンズ光学系を構築した。本分光イメージングシステムを用いて、LED をイメージセンサと同期して駆動させることで 190-1100nm の紫外光から近赤外光までの任意の波長を色収差なくリアルタイムに分光イメージングが可能であることを実証した。

本研究で創出した高輝度紫外光源下でも感度変化のない、紫外光から近赤外光まで感度を有する広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ、また本センサを用いて被写体の位置情報や波長情報を必要とする農業、医療等の幅広い分野に有用なリアルタイム分光撮像システムを実現するための指針を明らかにした。